

科学技术部科技攻关项目

国家自然科学基金 联合资助

国土资源部青年基金

# 干旱地区采煤条件下 煤层顶板含水层再造与地下水资源保护

张发旺 周骏业 申保宏 张光辉 程彦培 等著

地质出版社

· 北 京 ·

## 内 容 提 要

我国是水资源比较贫乏的国家，许多地区尤其是北方干旱地区煤矿开采引起水资源破坏，并严重制约着煤矿工业的可持续发展。大柳塔矿区是神府 - 东胜煤田特大型矿井之一，年产 6Mt，而矿井地处毛乌素沙漠东南缘，唯一的地下水资源位于煤层顶板含水层中，因此，探索与研究既能保证安全，又能保护水资源的切实可行的方法，对于大柳塔及神府 - 东胜煤田乃至北方干旱地区的“采煤保水”都具有特别重要的意义。

本书以大柳塔采煤条件下煤层顶板含水层变化规律分析入手，利用室内模拟、野外现场观测及理论分析成果，对含水层结构变化与地下水渗流之间的关系进行了深入研究，提出了“煤层顶板含水层再造”的概念，并总结出利用“含水层再造”保护地下水资源的新的观点、方法和理论，为北方尤其是西北干旱地区煤矿开采条件下地下水资源保护提供了一种新思路和新技术。

本书可供采矿、水文地质、环境地质、岩土工程、环境保护等领域的科研、教学、生产、设计人员及有关工作人员参考。

### 图书在版编目 (CIP) 数据

干旱地区采煤条件下煤层顶板含水层再造与地下水资源保护 / 张发旺等著. —北京: 地质出版社, 2006. 6

ISBN 7-116-04723-9

. 干... . 张... . 干旱区 - 煤层 - 顶板 - 含水层 - 研究 干旱区 - 煤矿开采 - 地下水资源 - 资源保护 . P641. 4

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2005) 第 161159 号

GANHAN DIQU CAIMEI TIAOJIANXIA  
MEICENG DINGBAN HANSHUICENG ZAIZAO YU  
DIXIASHUI ZIYUAN BAOHU

---

责任编辑: 屠涌泉 蔡卫东

责任校对: 郑淑艳

出版发行: 地质出版社

社址邮编: 北京海淀区学院路 31 号, 100083

电 话: (010) 82324508 (邮购部); (010) 82324571 (编辑部)

网 址: <http://www.gph.com.cn>

电子邮箱: [zbs@gph.com.cn](mailto:zbs@gph.com.cn)

传 真: (010) 82310759

印 刷: 北京长宁印刷有限公司

开 本: 787 mm× 1092 mm

印 张: 8.25

字 数: 180 千字

印 数: 1—600 册

版 次: 2006 年 6 月北京第一版 · 第一次印刷

定 价: 30.00 元

ISBN 7-116-04723-9/P · 2647

---

(凡购买地质出版社的图书, 如有缺页、倒页、脱页者, 本社出版处负责调换)

# 序

煤炭工业向西部战略转移，面临着许多环境问题，如地面变形、植被破坏、土地沙化、水文地质条件的改变、水资源枯竭以及水质污染等。而西北干旱地区具有特殊的水文地质条件和脆弱的生态环境，煤矿开采引起的地下水资源枯竭问题尤为突出，它不仅给矿区生产和生活造成直接危害，而且也是其他环境变异的催化剂。

神府 - 东胜煤田位于陕西与内蒙古交界处，与东部经济发达地区相毗邻，煤质好，储量大，埋藏浅，开采方便，是我国着手建设的世界级特大型煤炭基地。大柳塔矿井是神府矿区在建的特大型（6Mt/a）矿井之一。该矿地处毛乌素沙漠东南缘，井田地表大部分被风积沙所覆盖，植被很少，地下水资源极为宝贵。区内唯一的地下水源是下更新统三门组的砂砾含水层，直接覆盖在煤系地层之上，开采煤层的覆岩厚度小（最小厚度 20m），采高大（约 4m），工作面采用全套引进的现代化综采设备。在此条件下，探索与研究既能保证生产安全，又能保护水资源的切实可行的开采方法，是非常必要的。

随着神府煤田大柳塔矿区的开采，煤层上覆岩层不断发生冒落，形成冒落带及导水裂隙带，从而使含水层结构和地下水径流、排泄条件发生变化。第四系松散层潜水由水平径流、排泄为主将转化为以垂向渗漏为主，地下水位发生较大变化。在冒落带及导水裂隙带较发育且松散层富水性较强的地区，地下水位主要反映为持续下降，并形成下降漏斗；在冒落带及导水裂隙带发育且松散层富水性较差的地段，地下水位主要反映为含水层被疏干或降至基岩顶板。井田内地下水的超前疏干更加速了地下水资源量的减少。其结果是地下水水位将进一步大幅度下降，泉水很快断流，水资源形成枯竭的局面，严重影响该地区和矿区经济的持续健康发展。

作者针对这一现实情况，以合理开发煤炭资源、保护地下水资源、促进生态建设和国民经济可持续发展为目标，立足于“采煤保水”的思路，提出了“含水层再造”的概念，并在以下 5 个方面形成了具有一定创新意义的成果：

## （1）首采区煤层顶板固有精细结构和含水层特性分析

从首采区煤层顶板岩层层序及岩性特征分析出发，研究了煤层顶板自上而下的每一个岩层特征的精细变化。并根据煤层顶板水文地质构成、含隔水性能的构成、物理力学性质的构成，对煤层顶板固有精细结构和含水层类型

进行了分类。

## (2) 煤层顶板精细结构和含水层特性采动影响的基本规律分析

根据煤层顶板固有精细结构和含水层分类，应用岩石力学和断裂力学理论，研究了煤层顶板在采动条件下的应力变化与变形过程、煤层顶板结构和含水层特性采动影响的生成、发展、稳定、消失过程与规律，提出了煤层顶板精细结构和含水层特性采动影响模式。

## (3) 采动条件下煤层顶板裂隙的生成、含隔水性能的变化研究，阐明了煤层顶板在采动应力状态下含水层再造的过程和分布规律

煤层顶板裂隙的生成和含隔水层性能的变化是复杂的，不同的部位、不同的应力状态，其裂隙生成特征和含隔水性能变化不同。因此，本书针对煤层顶板在压剪、拉剪应力等状态下分别建立了不同部位含水层再造的模式。

## (4) 煤层顶板含水层再造与地下水渗流作用关系研究

煤层顶板含水层的再造会引起地下水渗流场的改变，地下水渗流场的改变又会反作用于含水层再造。本书通过深入分析煤层顶板含水层再造与地下水渗流场之间的互馈作用，为评价含水层再造与地下水资源保护的关系打下了坚实基础。

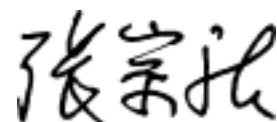
## (5) 确定了煤层顶板含水层再造与地下水资源保护的关系

含水层再造研究的目的是建立地下水渗流场与采动应力场条件下含水层再造的互馈作用关系，为干旱区经济可持续发展服务。

总之，本书提出了“含水层再造”的概念，研究了煤层顶板含水层再造与地下水资源保护的相互关系。在煤层顶板结构与采动应力场对含水层再造作用模式、含水层再造与地下水资源保护方面有所创新并处于领先地位；在煤层精细结构研究、煤层顶板裂隙岩体采动应力状态下的关系研究、含水层再造与地下水渗流场互馈作用研究等三方面跟踪研究前沿，并在采矿工程中有所前进与创新；在利用最优含水层再造成果对地下水资源保护方面达到领先水平，并在实践上力争达到实用程度。

最后，当此著作即将出版之际，我愿利用这一机会向有关部门专家推荐此书，并向编著者表示祝贺。

中国科学院院士  
中国工程院院士



2006年4月，石家庄

# 前 言

《干旱地区采煤条件下煤层顶板含水层再造与地下水资源保护》是作者综合承担或参加的国家自然科学基金“煤矿工业城市水环境演化及可持续发展预测”，国家科学技术部攻关项目“晋陕蒙接壤地区资源合理开发与环境治理综合研究”，国土资源部青年基金项目“典型矿业城镇地质-生态脆弱性特征及调控”成果，同时结合煤炭科学研究院开采研究所和西安水文研究所完成的“矿井水、地表塌陷与采矿相关性初期研究”成果编著而成的。

我国是水资源比较贫乏的国家，许多地区尤其是北方干旱、半干旱地区已有四分之一的地下水被开采而无法恢复，一些城市由于供水不足而严重阻碍工农业生产的发展。我国煤矿主要集中在北方，许多煤矿已由于水资源短缺而制约着煤炭工业的持续、稳定、协调发展。煤炭工业向西部战略转移，又面临着干旱矿区工农业及生活用水的严重困难。

神府-东胜煤田位于陕西与内蒙古交界处，与东部经济发达地区相毗邻，煤质好，储量大，埋藏浅，开采方便，是我国着手建设的世界级特大型煤炭基地。大柳塔矿井是神府矿区在建的特大型（6Mt/a）矿井之一。该矿1993年试生产，1996年正式投产，矿井地处毛乌素沙漠东南缘，井田地表大部分被风积沙所覆盖，植被很少，地下水资源极为宝贵。区内唯一的地下水源是下更新统三门组的砂砾含水层。该砂砾层直接覆盖在煤系地层之上，开采煤层的覆岩厚度小（最小厚度20m），采高大（约4m），工作面采用全套引进的现代化综采设备。在此条件下，探索与研究既能保证生产安全，又能保护水资源，即“采煤保水”的切实可行的开采方法，是非常必要的。

如何解决这一“采煤保水”问题？作者及同仁们在神府-东胜煤田，尤其是大柳塔矿区开展了大量的研究和实践工作。通过大量的研究发现煤层顶板结构在采动条件下使原有应力发生改变，应力的变化导致煤层顶板的损伤，损伤的结果是煤层顶板裂隙性发生改变，煤层顶板有的被错断，使本以张开的裂隙和相连通的裂隙变得闭合或互不连通，原来闭合的或不相连通的裂隙张开或变长以至相互连通，从而引起煤层顶板固有含水层结构特性的变化。如果采取一定措施使其变化控制在一定限度内，便可以增大储水空间，使水位降低，减少对煤层开采的水压威胁，若条件允许或采取一定措施还可以使更多的地下水资源储存其中而不被破坏，使水资源保护向着有利方向发展；若措施不当则会使含水层破坏超过一定限度，造成采空区与含水层之间的连

通，既威胁煤矿安全，又造成水资源的破坏。这一过程和规律叫做“含水层再造”。研究如何控制“含水层再造”的“度”是“采煤保水”的重要问题。本书正是解决这一重要问题的成果总结。

本书分为八章，第一章绪论，第二章大柳塔矿区地质及水文地质环境概述，第三章采煤条件下煤层顶板含水层再造分析，第四章含水层再造与地下水渗流，第五章大柳塔煤层顶板固有结构和含水层特征研究，第六章大柳塔矿区采动条件下煤层顶板含水层再造观测与模拟，第七章大柳塔矿区采煤顶板含水层再造对包气带水分运移的影响，第八章利用含水层再造保护水资源的措施。

本书模拟实验是煤炭科学研究总院完成的，书中还引用了该院科研人员的成果，在此向李效甫、项远法及其工作组全体成员表示感谢。感谢合作伙伴中国地质科学院水文地质环境地质研究所贾秀梅、张凤娥、刘文生、李金河等同志为该书的成果贡献了他们的心血。本书在编著过程中得到张宗祜院士、刘天泉院士、田开铭教授及万力、武强、李文鹏、邵景力、许兆义、何庆城、王玉平、石建省、张永波、胡瑞林、王贵玲、程彦培等教授的热情帮助和指导，在此向他们表示诚挚的谢意。侯新伟、韩占涛、宋亚新、杨会峰、陈立、沈辉、赵红梅等同学牺牲了许多休息时间帮助完成本书的编著工作，在此也向他们表示衷心的感谢。

书中不当之处，敬请批评指正。

著 者  
2006年4月

# 目 录

|                                  |       |
|----------------------------------|-------|
| 序                                |       |
| 前 言                              |       |
| 第一章 绪论                           | (1)   |
| 第一节 引言                           | (1)   |
| 第二节 裂隙渗流研究现状及成果创新性评述             | (2)   |
| 第三节 本书的研究思路、研究方法及其研究内容           | (8)   |
| 第二章 大柳塔矿区地质及水文地质环境概述             | (13)  |
| 第一节 概述                           | (13)  |
| 第二节 地质及水文地质环境概述                  | (13)  |
| 第三节 研究区面临的采煤与环境相互矛盾问题            | (18)  |
| 第三章 采煤条件下煤层顶板含水层再造分析             | (23)  |
| 第一节 采煤条件下煤层顶板含水层再造概述             | (23)  |
| 第二节 煤层顶板应力变化与变形过程                | (24)  |
| 第三节 煤层顶板含水层再造变化规律                | (29)  |
| 第四章 含水层再造与地下水渗流                  | (34)  |
| 第一节 裂隙岩体渗透特性                     | (34)  |
| 第二节 煤层顶板固有及采动状态下地下水渗透性变化分析       | (36)  |
| 第三节 含水层再造与地下水渗流的相互作用关系           | (37)  |
| 第五章 大柳塔煤层顶板固有结构和含水层特征研究          | (42)  |
| 第一节 研究方法                         | (42)  |
| 第二节 煤层岩性特征                       | (42)  |
| 第三节 大柳塔煤层顶板含隔水性能研究               | (48)  |
| 第四节 煤层顶板固有精细含水层结构模式              | (54)  |
| 第六章 大柳塔矿区采动条件下煤层顶板含水层再造观测与模拟     | (60)  |
| 第一节 煤层顶板含水层再造现场观测                | (60)  |
| 第二节 大柳塔矿区采矿煤层顶板含水层再造的模拟研究        | (76)  |
| 第三节 煤层顶板含水层再造高度预计                | (86)  |
| 第七章 大柳塔矿区采煤顶板含水层再造对包气带水分运移的影响    | (91)  |
| 第一节 实验区环境地质基本条件                  | (91)  |
| 第二节 实验项目及实验观测研究                  | (92)  |
| 第三节 实验区包气带水分运动参数的基本特征            | (96)  |
| 第四节 实验区包气带水分量、水势动态变化及其与土壤水资源的关系  | (99)  |
| 第五节 采矿条件下含水层再造后地下水位变化对包气带水分运移的影响 | (103) |

|                                |        |
|--------------------------------|--------|
| 第八章 利用含水层再造保护水资源的措施 .....      | ( 107) |
| 第一节 加强采煤顶板管理措施、维护含水层免遭破坏 ..... | ( 107) |
| 第二节 利用含水层再造结果分区保护水资源的可行性 ..... | ( 107) |
| 第三节 利用含水层再造结果分区保护水资源的措施 .....  | ( 110) |
| 结论 .....                       | ( 112) |
| 英文摘要 .....                     | ( 115) |
| 主要参考文献 .....                   | ( 117) |

# 第一章 绪 论

## 第一节 引 言

我国是水资源比较贫乏的国家，许多地区尤其是北方干旱、半干旱地区已有四分之一的地下水被开采而无法恢复，一些城市由于供水不足而严重阻碍工农业生产的发展。煤矿主要集中在北方，许多煤矿已由于水资源短缺而制约着煤炭工业的持续、稳定、协调发展。煤炭工业向西部战略转移，又面临着干旱矿区工农业及生活用水的严重困难。

神府 - 东胜煤田位于陕西与内蒙古交界处，与东部经济发达地区相毗邻，煤质好，储量大，埋藏浅，开采方便，是我国着手建设的世界级特大型煤炭基地。大柳塔矿井是神府矿区在建的特大型（6Mt/a）矿井之一。该矿1993年试生产，1996年正式投产，矿井地处毛乌素沙漠东南缘，井田地表大部分被风积沙所覆盖，植被很少，地下水资源极为宝贵。区内唯一的地下水源是下更新统三门组的砂砾含水层。该砂砾层直接覆盖在煤系地层之上，开采煤层的覆岩厚度小（最小厚度20m），采高大（约4m），工作面采用全套引进的现代化综采设备。在此条件下，探索与研究既能保证生产安全，又能保护水资源的切实可行的开采方法，是非常必要的。

事实上，由于本区特殊的水文地质条件和脆弱的生态环境，煤矿开采也将对开采区产生较大的环境影响。如地面变形、植被破坏、土地沙化、水文地质条件的改变、水资源枯竭以及水质污染等。在诸多因素中，采煤对地下水环境的影响尤为突出，它不仅给矿区生产和生活造成直接危害，而且也是其他环境变异的催化剂。

随着井田的开采，煤层上覆岩层不断发生冒落，形成冒落带及导水裂隙带，并在地表产生裂隙和塌陷区。因此，造成含水层结构和地下水径流、排泄条件发生变化。第四系松散层潜水由水平径流、排泄为主将转化为以垂向渗漏为主。地下水位发生较大变化。在冒落带及导水裂隙较发育且松散层富水性较强的地区，地下水位主要反映为持续下降，并形成下降漏斗；在冒落带及导水裂隙较发育且松散层富水性较差的地段，地下水位主要反映为含水层被疏干或降至基岩顶板。另一方面井田内施工了一些超前疏干泄水钻孔，更加速了地下水资源量的减少。通过对未来矿井疏干流场的预测表明，如果按目前的煤层开采方式，地下水水位将进一步大幅度下降，届时将会出现泉水断流，含水层被疏干，水资源形成枯竭的局面，严重影响该地区和矿区经济的持续健康发展。

生态环境是由地质、地貌、气候、水文、植物、土壤、动物以及微生物等共同组成的环境综合体。一方面对人类栖息生存起着生态功能；另一方面又几乎都是人类从事生产的对象，起着资源作用的功能。因此，生态环境的形态演变不仅与生态组成因素特性相关，还与资源开发和人类活动紧密相关。人类生存和发展离不开资源和环境。如果人类活动与资源环境承载能力及再生能力协调，则生态环境处于良性演替；如果人类不合理开发利

用，生态环境将会逆向演替，并将导致脆弱生态环境的产生。大柳塔矿井疏排水量大，在疏排影响范围内可导致地下水位大面积下降，又连锁引起土壤的田间含水量减少，使农作物和其他植物的生长受到影响。如1985年为开发矿区水源地，在尔林兔水源地勘探时，进行群孔干扰抽水，中心孔水位下降2.57m，致使地面玉米、沙柳等植被死亡。1988年在大柳塔水源地柳根沟泉域勘探时亦遇到类似情况。从而造成植被减少、土地贫瘠化与沙漠化，加剧水土流失，还使其他环境因素的质量（如大气含尘量）变差。目前，大柳塔矿采煤排水，其波及范围内部分泉水消失，民井水位下降或干涸，植被枯萎叶黄，使原有耕地不能继续耕种，生态环境逐渐恶化。

因此，既保证生产安全，又保护水资源的方针简而言之即是“保煤保水”的方针，是整个晋陕蒙接壤区保护生态环境、确保能源基地可持续发展的切实可行而有效的方针。这一方针的实施除实现矿区排供结合和污水资源化等措施外，探索和研究煤层顶板精细结构和采动条件下含水层再造过程和成果，进而利用含水层的再造成果探讨矿区地下水资源保护的可行性，更是一种切实可行的措施。

## 第二节 裂隙渗流研究现状及成果创新性评述

### 一、国内外岩体渗流研究现状及评述

岩体中裂隙的存在为地下水提供了储存和运移的场所，凡是在岩体中进行的各项工程活动必然受到裂隙渗流的影响，如水电工程、采矿工程、边坡工程、地下水资源、地热资源、油气田开发工程等。裂隙渗流不仅以机械、物理和化学的方式对裂隙空间结构、岩体力学性能产生作用，而且还以渗透压力作用于岩体，影响岩体中应力场的分布，所以裂隙渗流是岩体稳定分析中需要考虑的一个重要因素。

传统的裂隙渗流研究不考虑介质应力的变化，是在裂隙渗透空间不发生变形的前提下研究的。在实际中，岩体应力场的改变往往使裂隙产生变形，开度发生变化，由于裂隙的渗透性能取决于裂隙的开度，所以渗流场随着裂隙开度的变化而重新分布，进而渗流场又对应力场产生影响。

地下水在地质体中储存和运动是一个很复杂的问题，因为天然地质体自身结构就比较复杂，地下水在其中的运动又难于观察和测试，直到1856年，达西定律的发现才使人们对地下水进行定量研究。长期以来，学者们的研究基本上集中在孔隙介质中孔隙水的渗流，对于裂隙介质中的裂隙渗流问题基本上采用多孔介质渗流理论研究，直到20世纪40年代初期，才开始着手对裂隙岩体的水力性质以及其中地下水的流动进行定量的评价，并力图解释裂隙水流的特点，建立裂隙岩体的渗流模型。

裂隙是岩石在应力作用下的产物，不同裂隙在空间相互交叉配置形成了裂隙网络，裂隙网络在空间展布不均匀，甚至杂乱无章，从而决定了裂隙网络与多孔介质体在渗透空间方面有着极大的不同。因此，以渗透空间为分类的裂隙渗流与孔隙渗流有着本质的区别，表现为非均质和各向异性，另外，裂隙网络组成的渗透空间容易受到应力影响，裂隙渗流

与岩体应力场之间存在相互作用、相互影响的耦合关系，所有这些特点决定了裂隙渗流研究的难度较大。

目前，国内外学者在裂隙渗流领域的主要研究成果可以归纳为以下几个方面：单一裂隙渗流规律的研究，裂隙水流模型的研究，裂隙渗透性的研究，渗流应力耦合作用的研究等，其中含水介质破坏和再造问题是迄今研究最薄弱的环节，还没有见到较系统的文献资料。

### （一）单一裂隙渗流规律的研究

单裂隙作为岩体裂隙网络的基本单元，决定了地下水在岩体中的基本渗透特征，是各种渗流理论模型的基础。

单裂隙模型中发展最早的是平行板窄缝模型，它把裂隙概化为两光滑平行板之间的缝隙，1868年俄国著名流体学家布西涅斯基利用 Navier - Stocks 方程导出了液体在平行板缝隙中运动的理论公式：

$$q = \frac{g}{12V} b^3 J$$

式中： $q$ ——裂隙的单宽流量； $b$ ——裂隙开度； $J$ ——水力梯度； $g$ ——重力加速度； $V$ ——运动黏度。

由于这一公式体现了裂隙的过流能力与裂隙开度的立方成正比的关系，所以常被称为立方定律。

20世纪40年代开始，很多著名学者（沃洛季科，1941；洛米泽，1951；贝克尔，1954；罗姆，1966；路易，1967；日连科夫，1975）进行了大量单裂隙水力学实验对立方定律进行验证，表明水流呈层流时，立方定律成立，紊流状态时，流量公式有如下形式：

$$q = \frac{g}{12V} b^3 J$$

式中， $\alpha$  为非线性系数，取值  $[0.5, 1]$ ； $\alpha = 1$  时为层流状态， $\alpha = 0.5$  时为完全紊流状态。

天然裂隙与平行板模型之间相差很远，但这种差别主要是由于天然裂隙形状不规则，提高了对水流的阻力，所以利用粗糙度对立方定律进行修正。由此很多学者提出了各自的粗糙裂隙水流公式，差别在于对水流阻力取决于隙壁粗糙度的具体形式各家不一。切尔内绍夫（1979）在单个天然裂隙中进行了水流实验，并将实验值与根据各学者提出的粗糙裂隙水流公式计算结果进行对比，得出结论：在给定几何参数的条件下，考虑粗糙度并没有给预测裂隙水流量的精度带来益处，按光滑裂隙公式得出的流量偏高，但同测定岩体中天然裂隙几何参数的误差相比，其偏差不大。

另外，Tsang 等人认为隙宽服从对数正态分布，由计算机生成人工裂隙进行渗流分析，发现由于裂隙面在外力下压紧、咬合，通过单一裂隙的水流只集中于几条弯曲的沟槽之中，称之为沟槽流模型（1987）。Brown 利用分维几何原理借助计算机生成裂隙样本，取得了某些进展。

### （二）裂隙水流模型的研究

裂隙系统的复杂性使裂隙水流模型的研究比孔隙水模型的研究难度大，起步晚，发展

也较缓慢。自 20 世纪 60 年代以来，许多学者提出了裂隙渗流的理论模型，可归纳为三类：等效连续介质模型、双重介质模型和裂隙网络模型。

等效连续介质模型是以 Pomm (1958, 1966) 和 Snow (1965) 创立的渗透张量理论为基础，用连续介质方法描述岩体的渗流问题。渗透张量是按裂隙格局统计平均参数所建立的，可以表征裂隙介质及其水流的各向异性。根据统计学原理，平均值只是在不存在系统变化的条件下才能可靠地描述岩体，所以只有在岩体的小体积范围内，即在系统变化不明显的地方，才能应用渗透张量理论 (切尔内绍夫, 1979)。

双重介质模型是由原苏联学者巴伦布拉特等 1960 年首次提出的，假定岩体是孔隙介质和裂隙介质相重叠的连续介质，孔隙介质储水，裂隙介质导水。自巴伦布拉特提出“孔隙 - 裂隙二重性”的假定以来，很多学者 (Warran、Root, 1963; Duguill, 1977; Strelfova, 1977; Huyakorn, 1983) 提出了各自的双重介质理论模型，不同之处在于对裂隙系统和孔隙系统以及两系统之间的水交替进行了不同的概化。

巴伦布拉特等所建立的模型无疑为双重介质渗流理论奠定了基础，但它所反映的渗透机理却是狭隘的，认为现实中的裂隙配置都是杂乱无章的，水在裂隙岩石中的运动仅表现为两类不同空隙系统间的激烈水交替，当忽略水交替时，可把裂隙岩石比拟成各向同性的孔隙介质。因此，不能反映裂隙系统空间结构的不均匀性以及其中水流普遍具有的各向异性，是该模型的主要缺陷，而且在同一点给出两个压力值也是困难的 (田开铭, 1984)。

裂隙网络模型是把裂隙介质看作由不同规模、不同方向的裂隙个体在空间相互交叉构成的网络状系统，称为裂隙网络，地下水沿裂隙网络运动。线素模型 (Wittke, 1966、1968) 是裂隙网络渗流模型的基础，它将裂隙岩石的渗透空间视为由构成裂隙网络的隙缝个体组成，运用线单元法建立裂隙系统中水流量、流速及压力特征之间的关系。这是一种真实的水文地质模型，相当于对天然裂隙系统的映射，但它却是稳定流模型，不能反映裂隙水流的瞬间变化特征。原则上该模型既可用于有随机变异性的地段，也可用于有明显有规律系统变化的地段，但是由于查清每一条裂隙难以办到，因而只有在小范围且裂隙数量不大的地段，才能应用线素模型，而且线素模型未能将裂隙系统的空间组合关系用数学方法表示在模型中，仅列出了裂隙水流的几个基本方程，未能做进一步的推导使其组合在一起，所以方程个数多，形式也不规则，不利于理论分析和计算。但该模型将裂隙及其交叉点上的水动力关系逐个列出，揭示了裂隙水流运移的内在联系，为裂隙网络渗流模型的研究奠定了理论基础。

我国学者王恩志 (1991) 运用图论理论在线素模型的基础上建立了二维裂隙网络渗流模型，并从二维模型发展到三维模型。在三维裂隙网络渗流模型中用线单元、面单元和体单元来描述岩体中管状孔洞类、面状裂缝类、带状断层类结构面的渗流性能及其空间结构特征，这一模型体现了裂隙系统的极不均匀性和渗透水流的各向异性机制，能够表示每一条裂隙的水流渗透特点。为了克服查清每一条裂隙的困难，按天然裂隙系统的发育规律和渗透机制，王恩志、王洪涛 (1996) 又提出了“拟双重裂隙系统”的重要概念，实现了一维、二维、三维模型的耦合，使理论模型发展成能直接应用于实际的裂隙渗流模型。

在工程应用方面，杨静熙、田开铭、万力 (1990) 利用裂隙渗流理论解决了极为复杂的小浪底边坡问题，在三峡工程的正式实施中，裂隙渗流理论解决了一系列重大基础稳定性问题。

### (三) 裂隙渗透性的研究

裂隙渗透参数的确定是裂隙渗流研究中又一个重要的内容，这是实现模型对渗流模拟具有真实性的前提条件，这部分工作相当繁重，包括野外裂隙调查、大型水文地质实验，以及理论方面的研究。目前常用的方法有几何形态统计法、现场测试法、回归分析法等。渗透系数的确定一直为广大学者和工程界所重视，Snow 和 Pomm 早在 20 世纪 60 年代根据立方定律推导了渗透张量与裂隙几何参数的关系，田开铭教授等以裂隙水定向流动特性研究为基础提出了渗透张量的改进模型，模型中以链系数  $C_{i,j}$  表征每对方向裂隙组之间的连通程度，认为在考虑裂隙水偏流特性时应引入偏因子；并且与万力教授（1989）合作撰写了《各向异性裂隙介质渗透性的研究与评价》专著，并系统地介绍了裂隙介质渗透系数张量的各种确定方法。

现场测试法又分为压水实验法和抽水实验法两种。Snow（1966）首先提出求取各向异性渗透系数张量的压水试验法，后经 Rocha（1978）、Louis（1970, 1972）、Hsieh（1985）的研究，分别发展为校正系数法、三段压水试验法和交叉孔压水试验法。抽水试验法确定岩体渗透系数张量，是由 Papadapulos（1966）首次提出来的，Hantush（1966）、Way（1982）和 Neuman（1984）先后进一步研究，取得了重要成果。

### (四) 渗流应力耦合作用的研究

渗流与应力的关系，不少学者进行了研究。野外和室内实验均表明，有效应力的改变显著地改变裂隙张开度、流速和流体压力在裂隙中的分布，通过裂隙的水流量随正应力增加而降低很快。进一步研究还发现应力渗透曲线具有滞回现象，随加卸载次数的增加，裂隙渗透能力降低，但经过三四个循环后，应力渗透曲线就基本稳定。这一现象可以从裂隙受力闭合这一力学过程来解释。许多学者提出经验公式来描述渗透性随正应力的变化，Snow（1966）采用的公式为：

$$K_h = K_0 + A \left[ \frac{g (2b)^2}{4 \mu S} \right] \left[ \frac{P - P_0}{K_n} \right]$$

式中： $K_h$ ——水平裂隙的渗透系数； $K_0$ ——初始应力  $P_0$  作用下的渗透系数； $2b$ ——裂隙张开度； $K_n$ ——裂隙的正向刚度； $S$ ——裂隙间距； $A$ ——系数。

Jones（1975）提出了碳酸钙岩石裂隙渗透系数  $K$  的经验方程为：

$$K = K_0 [\lg (P_h / P)]^3$$

式中： $K_0$ ——常数； $P_h$ —— $K=0$  时愈合的有效应力。

Louis 和 Feuga 根据大量在裂隙岩体中各深度的钻孔抽水实验结果，得出应力状态对渗透系数影响的经验公式为：

$$K = K_0 \exp \left( - \frac{H - p}{\alpha} \right)$$

式中： $K_0$ ——地表渗透系数； $H$ ——覆盖岩层的重量； $p$ ——水压力； $\alpha$ ——系数，取决于岩石的断裂与特性。

关于剪应力和剪位移对裂隙渗透性影响的研究，目前做的工作还很少。Maini（1971）的初步实验表明，剪位移对裂隙渗透性有很大的影响。朱珍德（1997）、施婉（1998）都

对不同应力下渗流场进行了较深入的研究，认为当剪位移沿裂隙发生时，裂隙的平均张开度会发生变化，从而促使水力摩阻产生较大变化，而后者又将扰乱岩体中水压的分布，当因此而张开的裂隙能排水时，这种情况对工程常常是有益的，但它也能引起安全系数的降低，使变形增大。

综上所述，尽管裂隙渗流研究起步晚、难度大，但国内外学者经过几十年的努力，取得了显著的进展。从单裂隙渗流实验研究到裂隙网络渗流的物理模型、数学模型及其计算方法研究，从不变形岩体裂隙介质的地下水渗流研究，到考虑应力作用下岩体裂隙渗流问题的研究。然而裂隙渗流的研究毕竟还不够完善，有许多问题需要进一步深入探讨，如岩体内部空隙结构的实测方法研究、岩体水力学参数确定方法、岩体渗透空间结构以及岩体渗流与应力本构关系，渗流场与应力场耦合数学模型的计算方法、实际工程应用等。另外，在石油开发和核废料处置中，需要考虑温度场，因此，考虑岩体应力场、渗流场和温度场三场叠加的数学模型及其计算方法，也是今后研究的又一方向（康永尚，1996）。康永尚（1999）针对石油开发低渗透介质的渗流问题进行了实验和模拟研究，取得了许多有意义的认识。总之，裂隙渗流在基础理论和实际工程应用方面都需要广大学者的共同努力，使之不断发展完善。

## 二、本书创新性评述

为了比较清楚地阐述国内外研究现状，反映本书的创新性，下面将从本书研究内容诸方面，简明扼要地对国内外研究现状和本书所处地位做出评述，目的是阐明本书在哪些方面跟踪了国内外前沿，哪些方面具备领先和创新地位。

### （一）研究目的即地下水资源保护研究方面

国外最早涉及矿区地下水资源保护方面的成果要属原苏联 B·M 福明 1983 年的专著《采矿水文地质条件变化及保护》，该书对采矿引起地下水位下降、水资源枯竭及其他地下水有关的问题有些不太透彻的论述，在水资源保护建议中也只是就水的综合利用本身提出了建议。从国际开过的 8 届国际矿山水会议、国际性水会议及矿山水方面的刊物上也可以看出，西方发达国家和东欧一些矿山水文地质研究处于领先的国家中，对矿山水资源的保护也都是从水本身的综合利用和矿山水处理再利用角度提出的。至今还没有见到利用含水层再造成果对地下水资源保护的文献。

我国是个矿业大国，而且煤矿大都分布在缺水的北方。因此，在资源保护研究上能够赶上国际上的前沿，有些还处于领先地位。我国最早探讨水资源保护的是山西省阳泉矿务局，由于阳泉煤矿疏于排水引起娘子关泉的干涸和断流，于 1981 年开始组织有关专家研究保护水资源措施，1984 年报告中使用了“排供结合”这一现在被人们熟悉了的概念。之后，在国家计委和地质矿产部、煤炭工业部、有色金属总公司和冶金工业部的联合攻关下开展了《中国北方岩溶及大水资源合理开发利用》研究，该项目利用排供结合技术探讨了北方矿区水资源保护问题。1989 年以田开铭教授指导的学生夏日元硕士利用人工双层水位方法探讨了保护矿区地下水资源的技术。进入 20 世纪 90 年代，许多矿区相继开展了矿区排水水资源化工作，以达到保护水资源的目的。如焦作煤矿、开滦赵各庄矿、淄博

黑旺矿区等都在矿区“排供结合”方面取得了很好的经验。武强（1997）提出了考虑“采矿 - 排水 - 环境”三因素的矿区环境保护问题。总之，1995年以前除田开铭教授和夏日元硕士从顶板水力特性角度探讨了水资源保护技术外，其他专家和成果大都是从水本身去研究，基本没有见到从顶板含水层再造的利用角度去保护水资源的文献。鉴于此，作者及同仁们从1996年执行国家自然科学基金项目和国家攻关项目起，便开始着手从导致水资源破坏的含水层再造这一根本原因角度，逐步探讨利用含水层再造保护水资源。在1996年到1999年发表的《煤矿开采条件下地下水资源破坏及其控制》、《矿业开发环境地质链及其控制》和《煤矿开采水环境变化及其控制》3篇文章中提出了“煤层顶板含水层结构”和“含水层再造”的概念，并指出含水层再造可以用来保护地下水资源。本书正是这一思路的延续。

## （二）关于煤层顶板精细结构研究

国内外均有过比较成熟的煤层顶板研究，但多是从地质分析和力学角度，尤其是1998年刘天泉院士《露头煤柱优化设计理论与技术》专著以及武强教授的文章中，总结了这方面的研究成果，形成了系统的研究思路和体系。本书正是要跟踪这一新的思路和体系，试图将之应用到本人研究成果中，并在某些方面有所拓展。

## （三）煤层顶板含水层再造与地下水渗流场互馈作用研究方面

这方面的研究将吸收和消化孙钧教授指导下朱珍德博士论文《裂隙岩体非稳定渗流场与损伤场耦合问题的研究》的成果和思路，将水利工程问题引进到煤矿开采工程中，试图在采矿工程中建立这一新的研究思想体系。

## （四）煤层顶板结构与采动应力场对含水层再造耦合作用模型建立方面

也将引进朱珍德博士的成果和矿山压力控制的研究思想体系，实现自然条件、人为采动与含隔水性再造三者的有机综合研究。这从研究思想体系到研究成果都是以前没有过的，当然研究方法具有引进和综合性。

## （五）含水层再造与地下水资源保护研究方面

这种研究无论从研究基础还是研究思路上都未发现有过这样的文献，因此，本模型的建立是具有领先地位的。

总之，本书提出了“含水层再造”的概念，研究了煤层顶板含水层再造与地下水资源保护的相互关系。将在煤层顶板结构与采动应力场对含水层再造作用模式、含水层再造与地下水资源保护方面形成创新并处于领先地位，在煤层精细结构研究、煤层顶板裂隙岩体采动应力状态下的关系研究、含水层再造与地下水渗流场互馈作用研究等三方面跟踪研究前沿，并在采矿工程中有所前进与创新；在利用最优含水层再造成果对地下水资源保护方面达到领先水平，并在实践上力争达到实用程度。

## 第三节 本书的研究思路、研究方法及研究内容

### 一、煤层顶板结构变化和含水层再造的一般规律

我们知道，煤层采出后，上覆岩层因失去支撑而发生破坏和位移，自上而下一般出现冒落带、裂隙带和弯曲带。覆岩的破坏，常引起煤层顶板结构的变化，这种变化表现为：岩性组合、岩性基本物理性质（密度、水理性、空隙性、破坏性）、力学参数、岩石强度等，从而产生含水性、透水性及隔水性的再造，但各带对煤层顶板结构的变化及含水层再造的影响是不同的。冒落带内岩块之间空隙多，煤层顶板在该带内结构变化最大，含水层再造强烈，常使煤层顶板中原有的隔水层被破坏，形成富水性、含水性极大程度增强的含水层再造成果；裂隙带内既有离层裂隙（即层间裂隙），也有垂向裂隙，这样该带内的煤层顶板结构发生了较大的变化，层间裂隙形成储水和导水的通道，垂向裂隙可与层间裂隙连通，尤其在裂隙带下部，垂向裂隙发育，导水性明显增强，含水层发生一定程度的再造，煤层顶板原有的隔水性一定程度上遭到破坏，富水性、含水性及垂向和层间导水性产生一定程度的增强；弯曲带上部一般很少出现离层，其下部出现的离层裂隙仅局部发生，处于该带内的煤层顶板结构发生了一些变化，下部离层裂隙仅局部充水，一般不与裂隙带导通，至一定深度即闭合，故弯曲带具有隔水保护层的作用，含水层发生了一些再造，富水性、含水性、导水性和隔水性均有一些增强，部位发生了一些改变。

影响各带中煤层顶板结构变化和含水层再造过程和程度的因素主要有 5 个方面：

#### 1. 覆岩岩性及其组合关系

据覆岩岩性及其组合，可将覆岩的直接顶板——老顶归纳为 4 种类型：坚硬 - 坚硬型，其直接顶板和老顶均为硬岩层，冒落带内煤层顶板结构变化很大，含水层再造程度大；软弱 - 软弱型，其直接顶板和老顶均为软弱岩层，易冒落和弯曲，煤层顶板结构发生一些变化，含水层再造过程快，但程度较坚硬岩层小得多；软弱 - 坚硬型，其直接顶板为软弱岩层，老顶为坚硬岩层，煤层顶板结构变化和含水层再造程度受老顶高度的控制，老顶位置低则结构变化和含水层再造程度大，反之则小；坚硬 - 软弱型，其直接顶板为坚硬岩层，老顶为软弱岩层，煤层顶板结构变化和含水层再造程度均属中等。

#### 2. 断裂构造影响

位于采煤工作面上半部的高角度张性断层或导水断层，通常容易引起导水裂隙沿断裂破碎带向上发育；位于正常冒落带以上而接近该带的断层，有可能在冒落带向上发展时到达该断层。这两种情况下，冒裂高度均会超过正常区域，而位于正常冒落带范围内低角度平缓的断层，一般不会影响冒裂高度的发展。也就是说煤层顶板高角度断裂构造会引起其顶板结构较大变化，含水层再造也很明显；而倾角平缓的断层，引起的顶板结构变化较小，含水层再造也不很明显。

#### 3. 煤层采高和分层开采

在其他条件一定时，导水裂隙带高度随采高的增加而增大，在开采缓倾斜单一煤层或

煤层的第一分层时，裂高与采高呈近似直线关系；在开采急倾斜煤层时，采高越大，裂高越大。对于多分层开采时就近距离煤层或近距离煤层群来讲，与裂高关系最密切的是第一、二分层，其下各分层的影响显著减弱。显然，采高越大煤层顶板结构变化越大，含水层再造程度也会越大；第一、二分层之上的顶板结构变化越大，含水层再造程度也大，而其下各分层结构变化和含水层再造程度则变小。

#### 4. 走向长度和采空区尺寸

走向长度是决定顶板结构变化和含水层再造程度的重要因素。当采空区尺寸足够大时，导水裂隙高度得到充分发展，煤层顶板结构发生很大变化，含水层再造程度也非常大；相反，当采空区尺寸不足以使导水裂隙带内岩层达到充分移动时，煤层顶板结构变化和含水层再造程度均较小。

#### 5. 开采方法及顶板管理

实践表明，对于倾斜及缓倾斜煤层，采用单一长壁和倾斜分层采煤法时，对于急倾斜煤层，采用沿走向推进的伪倾斜柔性掩护支架采煤法及水平分层人工假顶下行陷落式采煤法时，可使煤层顶板结构有较小的变化，有效地抵制导水裂隙带高度的发展，含水层再造程度较小，最近引进的房柱式开采也是非常有效的。就顶板管理方法而言，全部垮落法使煤层顶板结构变化和含水层再造程度最大；全部充填法可使煤层顶板结构变化程度最小，但不利于煤矿经济效益的提高；局部充填法及煤柱支撑法可经济合理地使煤层顶板结构变化和含水层再造程度适应保护煤矿水资源的目標。

## 二、本书研究思路

由一般规律的阐述可以看出，煤层开采会不同程度地引起煤层顶板结构的变化和含水层的再造，这种结构变化和含水层再造的结果有的既有利于煤矿安全生产，又有利于地下水资源的保护，而有的则既不利于安全生产，又不利于地下水资源的保护，那么顶板结构变化和含水层再造到底是如何发生的，其程度大小如何定量判别？在什么样的情况下，采取哪些措施才能使这种结构变化和含水层再造向着既有利于安全生产，又保护地下水资源的方向发展？如何应用煤层顶板结构的变化和含水层再造的成果去保护地下水资源？这些问题都是本书所要解决的。

依据煤层顶板结构变化和含水层再造一般规律及解决问题的特点，我们确定研究思路时考虑了如下基本点：

(1) 煤层顶板结构变化和含水层再造是煤层顶板固有结构特性和人为开采煤层耦合作用的结果。其固有特性主要表现为煤层顶板岩性、物理性质、力学性质和岩石强度及其组合关系，人为开采主要表现为煤层采高、走向长度、开采方法及顶板管理等。因此，本书将从煤层顶板固有的结构和含水层的性质研究入手，研究顶板各种特性的细微变化，即煤层顶板的精细结构，进而探讨在采动条件下煤层顶板岩层移动与变形过程和结果，尤其是“三带”中煤层顶板精细结构的变化以及裂隙形成与发展，重点研究煤层顶板含、隔水性能的采动影响与变化的变异规律。实现煤层顶板固有特性与人为开采对顶板结构和含水层再造影响的耦合研究。

(2) 采动条件下煤层顶板结构变化与含水层再造的作用结果使地下水渗流场发生变